



УДК 539.6:621.926

И. И. Злотников¹, И. В. Захаров²

¹к.т.н., доцент, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь; ²д.т.н., профессор, Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ В МИКРОТРЕЩИНЕ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

На основе электромагнитной теории молекулярного взаимодействия тел проанализировано поведение технологической жидкости в микротрещине, образующейся при механическом разрушении минералов. Предложена формула для расчета силы взаимодействия поверхностей материала, разделенных микротрещиной. Показано, что сила взаимодействия поверхностей микротрещины зависит от соотношения между диэлектрическими характеристиками породы и жидкости. Рассмотрена применимость предложенной формулы для прогнозирования эффективности использования конкретных жидкостей при механической обработке горных пород и минералов.

Ключевые слова: технологическая жидкость, молекулярные силы, диспергирование, диэлектрическая проницаемость.

Введение. Разрушение горных пород и минералов является определяющим процессом многих современных технологий: измельчение полезных ископаемых при их обогащении, бурение скважин, распиловка и сверление камня, дробление щебня, диспергирование минералов для получения тонкодисперсных порошков используемых при изготовлении керамики, пигментов, композиционных материалов. Разрушение является сложным физико-механическим и физико-химическим процессом, на протекание которого влияют химический и фазовый состав, структура, анизотропия, распределение напряжений, окружающая среда, параметры процесса разрушения и многие другие факторы.

Одним из наиболее перспективных направлений в совершенствовании процесса разрушения горных пород является использование технологических жидкостей: буровых растворов, смазочно-охлаждающих и расклинивающих жидкостей, поверхностно-активных веществ. Жидкость, проникая в поровые каналы, имеющиеся в породе, и микротрещины, возникающие в твердом теле при воздействии рабочего инструмента, создает в них расклинивающее давление (эффект Ребиндера [1]), способствуя снижению усилия разрушения материала, что в конечном итоге приводит к увеличению производительности и снижению энергозатратности процесса. Молекулы жидкости, стремясь покрыть всю поверхность тела, проникают в зародышевые трещины и дефекты, мигрируя по их стенкам со скоростью, превышающей скорость всасывания жидкости в зазор. Снижение поверхностной энергии микротрещин σ внутри материала приводит к облегчению их развития под действием механических напряжений и смещению критерия Гриффитса для разрушающего напряжения P в сторону более низких значений:

$$P = k \cdot (\sigma \cdot E / L)^{1/2},$$

где k – коэффициент пропорциональности, E – модуль упругости материала, L – длина трещины.

Кроме того, когда молекулы жидкости достигают зон, где ширина микротрещин примерно равна размеру молекул, адсорбционный слой своим давлением стремится расклинить эту трещину для дальнейшего продвижения молекул. Давление на стенки микротрещины у ее вершины может достигать до 10 ГПа [2].

Из всего вышесказанного следует, что технологическая жидкость, используемая при разрушении и измельчении горных пород и минералов любым способом, должна обладать не только высокой смачивающей способностью (низкой поверхностной энергией), но и снижать силы молекулярного взаимодействия между вновь возникающими при прорастании микротрещин поверхностями, способствуя тем самым снижению механической прочности материала.

Цель работы – на основе электромагнитной теории молекулярных сил проанализировать поведение технологической жидкости в микротрещинах, образующихся при механическом воздействии инструмента на горную породу и использовать полученные результаты для прогнозирования перспективности применения конкретных жидкостей в процессах разрушения горных пород и минералов.

Постановка вопроса. Наиболее общим способом расчета молекулярных сил взаимодействия двух твердых поверхностей является электромагнитная теория Е. М. Лифшица развитая в работах [3-5]. В данных работах было

получено общее выражение для силы F , действующей на единицу площади каждого из двух конденсированных тел, которые разделены зазором шириной l , заполненным третьей средой.

Хотя формулы, приведенные в этих работах сложны, современные методы вычислительной техники позволяют рассчитать силу F , если известны зависимости диэлектрических проницаемостей рассматриваемых веществ от мнимой частоты $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$. Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(i\xi)$ связана с мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon''(\omega)$ соотношением Крамерса-Кронига [5, 6]:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\varepsilon''(\omega)\omega}{\omega^2 + \xi^2} d\omega. \quad (1)$$

Таким образом, функции $\varepsilon''(\omega)$ являются достаточно полными характеристиками твердых тел, которые определяют силу молекулярного притяжения между ними. Однако эти аналитические зависимости плохо известны для большинства материалов. Поэтому для прогнозирования взаимодействия между телами используют различные приближенные формулы.

Когда зазор между телами l мал по сравнению с длинами волн λ , характерными для спектров поглощения взаимодействующих тел (нет запаздывания электромагнитных волн), и температуры малы, т.е. выполняется условие $\frac{lkT}{\hbar c} \ll 1$ формула для силы взаимодействия, согласно данной теории имеет вид [4]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_0^\infty \frac{[\varepsilon_1(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)]}{[\varepsilon_1(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)][\varepsilon_2(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)]} d\xi. \quad (2)$$

Как отмечалось выше зависимости $\varepsilon''(\omega)$, а следовательно и $\varepsilon_{1,2,3}(i\xi)$ плохо известны для большинства материалов, поэтому в различных исследованиях предлагаются приближенные формулы для расчета силы взаимодействия. Так в монографии [7] были получены приближенные формулы для расчета ван-дер-ваальсовых сил, действующих между двумя телами, разделенными зазором l , заполненным жидкостью, в которых принимается во внимание поглощение только в области оптических частот (видимая ультрафиолетовая и инфракрасная области спектра). С учетом сказанного была получена формула, удобная для практического применения [7]:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi^2 l^3 \sqrt{2}} \frac{\alpha_0(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30})(\varepsilon_{20} - \varepsilon_{30})}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2} [(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30})^{1/2} + (\varepsilon_{20} + \varepsilon_{30})^{1/2}]}, \quad (3)$$

где ω_0 – главная частота поглощения всех трех диэлектриков, ε_{10} , ε_{20} , – статические диэлектрические проницаемости двух твердых тел, а ε_{30} – диэлектрическая проницаемость пленки жидкости.

В той же монографии [7] рекомендуется при расчетах вместо статических значений диэлектрических постоянных использовать их значения в рассматриваемом оптическом диапазоне $\varepsilon = n^2$:

$$F(l) = \frac{\hbar}{16\pi^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(n_1^2 - n_3^2)(n_2^2 - n_3^2)}{(n_1^2 + n_3^2)^{1/2}(n_2^2 + n_3^2)^{1/2}[(n_1^2 + n_3^2)^{1/2} + (n_2^2 + n_3^2)^{1/2}]},$$

где $n_{1,2,3}$ – показатели преломления соответствующих диэлектриков на частоте ω_0 .

При разрушении материала оба взаимодействующих твердых тела одинаковы (стенки микротрещины, образующиеся в веществе под режущим инструментом) и формула (3) принимает вид:

$$F(l) = \frac{\hbar}{32\pi l^3 \sqrt{2}} \frac{\omega_0(n_1^2 - n_3^2)^2}{(n_1^2 + n_3^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где n_l – показатель преломления твердого тела, n_3 – показатель преломления применяемой технологической жидкости в области рассматриваемых частот поглощения. Из данной формулы следует, что при условии $n_l = n_3$ сила взаимодействия образующихся новых поверхностей микротрещины будет минимальна и технологическая жидкость, таким образом, обеспечит максимальный эффект понижения прочности материала.

Если сравнить коэффициенты преломления кварца, стекла, а также некоторых минералов и жидкостей, приведенные в таблице 1, то можно сделать вывод что в качестве технологической жидкости для разрушения (измельчения, резки, сверления), кварца и стекла наиболее подходит глицерин.

Таблица 1 – Значения диэлектрической проницаемости ε_0 и показателя преломления n_D веществ при температуре 20 °С

Вещество	ε_0	n_D
Кварц плавленный	3,85	1,46
Стекло листовое	4,9-5,1	1,47
Вода	80,5	1,33
Глицерин	42,5	1,47
Этиленгликоль	37,7	1,43
Ацетон	20,8	1,36
Этиловый спирт	24,3	1,36

Парафин жидкий (фракция C ₁₀ -C ₁₃)	1,95	1,48
Керосин (фракция C ₁₂ -C ₁₅)	2,10	1,44
Бензол	2,28	1,50
Толуол	2,38	1,50

Однако из литературных источников известно, что глицерин не пригоден для этих целей. В то же время керосин очень хорошо зарекомендовал себя при резке стекла [8], хотя его показатель преломления ($n = 1,44$) значительно отличается от показателя преломления стекла. Так же известно, что дробление горных пород в таких жидкостях как керосин или соляровое масло позволяет значительно повысить производительность процесса дробления [9].

Из вышесказанного следует, что формула (4) является слишком приближенной, не отражает всех особенностей молекулярного взаимодействия, происходящего в узком зазоре между стеклянными поверхностями заполненном жидкостью и требует дальнейшего уточнения.

В связи с вышеизложенным, была предпринята попытка более детального анализа поведения жидкости в узком зазоре и вывода более точных аналитических зависимостей, связывающих силу молекулярного взаимодействия поверхностей и их диэлектрические и оптические характеристики.

Анализ поведения жидкости в узком зазоре. Как отмечалось выше, спектры поглощения диэлектриков имеют вид полос, где наряду с широкими областями прозрачности существуют зоны поглощения. Если пренебречь имеющимся малым поглощением на участках прозрачности, а в полосе поглощения функцию $\varepsilon''(\omega)$ аппроксимировать достаточно простой, но близкой к реальной аналитической зависимостью, то по формуле Крамерса-Кронига (1) можно вычислить зависимость $\varepsilon(i\xi)$, по которой найти силу взаимодействия поверхностей. Физически обоснованным будет представление зависимости $\varepsilon''(\omega)$ в виде известной формулы Дебая [10]:

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \cdot \omega \tau. \quad (5)$$

где ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость, ε_∞ – высокочастотный предел, к которому стремится действительная часть диэлектрической проницаемости с увеличением частоты; τ – время релаксации, которое связано с резонансной частотой ω_0 формулой $\tau = 1/\omega_0$. Сказанное выше иллюстрирует рисунок 1.

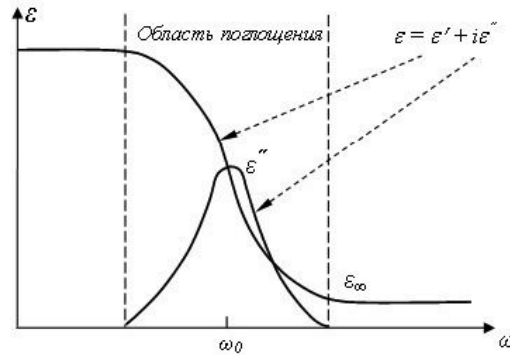


Рисунок 1 – Зависимость действительной ε' и мнимой частей ε'' комплексной диэлектрической проницаемости ε от частоты

Будем считать, что взаимодействующие тела имеют одну общую интенсивную полосу поглощения ω_0 . Обозначив для краткости $\varepsilon^* = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ и подставив выражение (5) в формулу (1) проведем интегрирование:

$$\varepsilon(i\xi) = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \cdot \frac{d\omega}{\omega^2 + \xi^2} = 1 + \frac{2\varepsilon^*}{\pi} \cdot \frac{\tau}{1 + \tau^2 \xi^2} \left(\int_0^\infty \frac{d\omega}{1 + \omega^2 \tau^2} - \int_0^\infty \frac{\xi^2 d\omega}{\omega^2 + \xi^2} \right) = 1 + \frac{\varepsilon^*(1 - \tau\xi)}{1 + \tau^2 \xi^2}. \quad (6)$$

Если в спектрах взаимодействующих тел присутствует несколько полос сильного поглощения, то в полученной формуле их вклад будет суммироваться:

$$\varepsilon(i\xi) = \sum_n \left(1 + \frac{\varepsilon_n^*(1 - \tau_n \xi)}{1 + \tau_n^2 \xi^2} \right). \quad (7)$$

Подставив полученное выражение (6) в формулу (2) т.е. ограничившись предположением об одной полосе сильного поглощения и учитывая, что при разрушении тела $\varepsilon_1(i\xi) = \varepsilon_2(i\xi)$, получаем:

$$F(l) = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \int_0^\infty \left(\frac{\varepsilon_1(i\xi) - \varepsilon_3(i\xi)}{\varepsilon_1(i\xi) + \varepsilon_3(i\xi)} \right)^2 d\xi = \frac{\hbar}{8\pi^2 l^3} \cdot \frac{(\varepsilon_1^* - \varepsilon_3^*)^2}{2\tau} \cdot \frac{1}{\varepsilon_1^* + \varepsilon_3^* + 2}.$$

Возвращаясь к обозначению $\varepsilon^* = \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty$ и $\tau = 1/\omega_0$ окончательно получаем:

$$F(l) = \frac{\hbar \omega_0}{16\pi^2 l^3} \cdot \frac{(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30} + \varepsilon_{3\infty} - \varepsilon_{1\infty})^2}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30} - \varepsilon_{1\infty} - \varepsilon_{3\infty} + 2)}. \quad (8)$$

При проведении количественных вычислений вместо высокочастотного предела ε_∞ можно использовать квадрат оптического показателя преломления n^2 [11]:

$$F(l) = \frac{\hbar \omega_0}{16\pi^2 l^3} \cdot \frac{(\varepsilon_{10} - \varepsilon_{30} + n_3^2 - n_1^2)^2}{(\varepsilon_{10} + \varepsilon_{30} - n_1^2 - n_3^2 + 2)}. \quad (9)$$

Сравнение формул (4) и (9) показывает, что сила взаимодействия двух поверхностей твердого тела, разделенных тонким слоем жидкости, в равной степени зависит как от соотношения между показателями преломления, так и значениями статических диэлектрических проницаемостей твердых тел и жидкости. Исходя из формулы 9, становится понятным, почему такие жидкости как вода, глицерин (таблица 1) не пригодны в качестве технологических жидкостей для измельчения минеральных веществ. С другой стороны из формулы (9) и данных таблицы 1 следует, что для измельчения например стекла и кварца наименьшую силу притяжения, а соответственно и максимальный расклинивающий эффект обеспечивают углеводородные жидкости – керосин, жидкий парафин.

Таблица 2 – Фракционный состав продуктов, мас. %

Фракция, мкм	Используемая технологическая жидкость			
	Без жидкости	Вода	Ацетон	Жидкий парафин
200-315	3	2	1	Следы
140-200	8	6	5	1
100-140	26	28	24	14
80-100	22	25	31	29
63-80	17	20	18	31
50-63	12	11	10	21
менее 50	10	8	11	14

Для проверки полученных закономерностей были проведены эксперименты по диспергированию кварцевого стекла с использованием различных жидкостей (вода, жидкий парафин, ацетон). Для измельчения образцов использовали планетарную мельницу «Пульверизетте-5». В размольный стакан засыпали шары и порошок кварцевого стекла фракции

200-315 мкм, который смачивали выбранной жидкостью. С помощью набора сит определяли фракционный состав порошков после 30 мин помола. Результаты проведенных экспериментов приведены в таблице 2.

Как следует из представленных данных, использование жидкого парафина в качестве технологической жидкости позволяет интенсифицировать процесс диспергирования (значительно увеличить выход более мелких фракций).

Заключение. Таким образом, чтобы находящаяся в микротрещине растущей под обрабатывающим инструментом при разрушении твердого тела технологическая жидкость обеспечивала минимальную силу притяжения поверхностей трещины необходимо:

– отсутствие взаимно перекрывающихся полос поглощения в спектрах твердого тела и жидкости, а при невозможности обеспечения этого условия ширина зоны перекрытия полос должна быть минимальной;

– если имеется выраженное взаимное перекрытие полос, то сила взаимодействия зависит от соотношения между показателями преломления и значениями статических диэлектрических проницаемостей твердого тела и жидкости;

– перспективными технологическими жидкостями, ускоряющими процесс разрушения и диспергирования минеральных веществ, являются жидкие парафины линейного строения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Ребиндер, П. А.**, Поверхностные явления в твердых телах в процессах из деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Шукин // Успехи физич. наук. – 1972. – Т. 108, вып. 1. – С. 3-42.

2 **Гаркунов, Д. Н.** Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

3 **Лифшиц, Е. М.** Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами / Е. М. Лифшиц // ЖЭТФ. – 1955 – Т. 29, вып. 1. – С. 29-110.

4 **Дерягин, Б. В.** Общая теория ван-дер-ваальсовых сил / Б. В. Дерягин, И. И. Абрикова, Е. М. Лифшиц, // Успехи физич. наук. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 381-422.

5 **Дзялошинский, И. Е.** Общая теория ван-дер-ваальсовых сил / И. Е. Дзялошинский, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский // Успехи физич. наук. – 1961. – Т. 73, вып. 3. – С. 381-422.

6 **Ландау, Л. Д.** Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 624 с.

7 **Израелашвили, Дж.** Межмолекулярные и поверхностные силы / Дж. Израелашвили. – М.: Научный мир, 2011. – 457 с.

8 **Овчинникова, Е. И., Литвинов В. А., Хазова Т. А.** Оптимальные параметры резки стекла твердосплавным роликом / Е. И. Овчинникова, В. А. Литвинов, Т. А. Хазова // Стекло и керамика. – 1984. – № 1. – С. 12-14.

9 **Зомбек, П. В.** Электроимпульсная технология получения щебня и его использование в асфальтобетонных смесях: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 27.12.05 / П. В. Зомбек; ТГАСУ. – Томск, 2005. – 24 с.

10 **Поплавко, Ю. М.** Физика диэлектриков / Ю. М. Поплавко. – Киев: Вища школа, 1980. – 400 с.

11 **Вукс, М. Ф.** Электрические и оптические свойства молекул и конденсированных сред / М. Ф. Вукс. – Л.: ЛГУ, 1984. – 334 с.

Материал поступил в редакцию 27.08.15.

И. И. Злотников¹, И. В. Захаров²

Тау жыныстары мен минералдарының қирауы кезіндегі микросызаттағы технологиялық сұйықтықтың мінез ерекшеліктерін зерттеу

¹П.О. Сухов атындағы

Гомель мемлекеттік техникалық университеті, Гомель қ., Беларусь;

²С. Торайғыров атындағы

Павлодар мемлекеттік университеті, Павлодар қ.

Материал 27.08.15 баспаға түсті.

I. I. Zlotnikov¹, I. V. Zakharov²

Investigation of processed fluid conduct in microcracks in rock and minerals failure

¹P. O. Sukhoi, Gomel State Technical University, Gomel, Belarus;

²S. Toraihyrov Pavlodar State University, Pavlodar.

Material received on 27.08.15.

Денелердің молекулярлық өзара іс-әрекетінің электрмагниттік теориясы негізінде, минералдардың механикалық қирауы кезінде қалыптасқан микросызаттағы технологиялық сұйықтықтың мінезі талданды. Микросызатпен бөлінген материал беттерінің өзара іс-әрекет күшін есептеу үшін формула ұсынылған. Микросызат беттерінің өзара іс-әрекет күші жыныстар мен минералдардың диэлектрлік сипаттамалары арасындағы қатынасқа тәуелді екені көрсетілген. Тау жыныстары мен минералдарын механикалық өңдеу кезіндегі нақты сұйықтықтарды пайдалану тиімділігін болжауға ұсынылған формуланың қолданылуы қарастырылған.

On the basis of the electromagnetic theory of molecular interaction of bodies there was analyzed the behavior of the processed fluid in the microcracks formed by mechanical destruction of minerals. The formula was offered for calculating the interaction force of surface material separated by microcracks. It was shown that the strength of surface microcracks interaction depends on the relationship between the dielectric characteristics of the rocks and fluids. The applicability of the proposed formula for predicting the effectiveness of specific fluids in machining of rocks and minerals.